УДК 541.125.012.546.79.001.879.462

ФТОРИДЫ ГАЛОГЕНОВ В ТЕХНОЛОГИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА. СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ

И.И. Жерин

Томский политехнический университет
E-mail: gerin_i@phtd.tpu.edu.ru

Приведен обзор результатов экспериментальных исследований синтеза галогенфторидов, их физико-химических свойств, кинетики фторирования галогенфторидами некоторых урансодержащих соединений. Показано что фторирование подчиняется закономерностям диффузионной кинетики.

Фторидные методы играют важную роль в современной технологии ядерных материалов и являются перспективными при переработке облученного ядерного топлива. Применение этих методов позволяет не только сократить технологическую схему переработки отработанного топлива, но и существенно уменьшить объемы радиоактивных отходов, особенно жидких [1–4]. Процессы фторирования используют и для уда-

ления урансодержащих отложений, накапливающихся в технологическом оборудовании при получении, очистке и переработке гексафторида урана. При накоплении отложений происходит изменение технологических и эксплуатационных параметров работы аппаратов, поэтому важно удалять их из оборудования и коммуникаций. Эта проблема особенно актуальна для центрифужного оборудования при разделении изотопов. Кроме того, отложения содержат значительные количества урана, в том числе высокообогащенного (в виде его фторидов и оксофторидов), что приводит к потерям продукта и снижению ядерной безопасности производства. Для удаления урансодержащих отложений из оборудования нецелесообразно использовать молекулярный фтор по причине низких скоростей и недостаточной полноты протекания реакций, необходимости поддержания повышенных температуры и давления в реакционном объеме.

Для получения фторидов урана, переработки топлива и удаления урансодержащих отложений из технологического оборудования можно использовать фториды галогенов, имеющие важное преимущество по сравнению с фтором, так как эти соединения и их смеси обладают более высокой фторирующей и окислительной способностью при пониженных температурах и давлениях [5–7]. Галогенфториды (ClF_3, BrF_3, BrF_5 и др.) и их смеси можно успешно применять для фторирования урана и его соединений, при этом реакции практически полностью протекают до образования гексафторида урана. Процессы с участием фторидов галогенов идут как в газовой, так и в жидкой фазах при температурах более низких, чем в процессах с применением элементного фтора, что должно снизить энергетические затраты, повысить коррозионную стойкость и сроки эксплуатации оборудования, организовать безотходные технологии переработки ядерного топлива [2, 4, 8, 9].

Синтез галогенфторидов и их физико-химические свойства

Процессы синтеза фторидов галогенов весьма сложны и зависят от совокупности факторов: температуры, скорости газового потока, соотношения реагирующих компонентов, содержания инертных газов, поверхности реагирования, а также определяются присутствием насадок различной природы в качестве катализаторов.

Синтез галогенфторидов проводится преимущественно путем взаимодействия элементов [5, 6, 10, 11], при этом присутствие примесей в целевом продукте во многом зависит от чистоты фтора, получаемого электролизом из расплавов дифторида ($KF{\cdot}HF$) или трифторида калия ($KF{\cdot}2HF$) [12].

Были проведены термодинамические расчеты химических равновесий в многокомпонентных системах Cl_2-F_2-ClF-ClF_3; Br_2-F_2-BrF-BrF_3-BrF_5; I_2-F_2-IF-IF_3-IF_5-IF_7 [10, 11], которые позволили определить равновесные составы и выходы целевых продуктов реакций при различных температурах и мольных соотношениях X_2:F_2 (где X = Cl, Br, I).

Установлено, что при эквимолярных соотношениях галоген (Cl_2, Br_2, I_2) – фтор максимальный равновесный выход галогенфторида должен наблюдаться при следующих температурах: 553,15…573,15 К для ClF_3; 393,15±5 К для BrF_3; 523,15…573,15 К для BrF_5 в присутствии CuF в качестве катализатора; 473,15±5 К для IF_5 и 573,15±5 К для IF_7 [11, 13].

Однако практический выход целевых продуктов во многом зависит от кинетических параметров химических реакций. Изучение кинетики процессов взаимодействия фтора с галогенами проводили динамическим методом в проточном реакторе [11].

Термодинамические расчеты констант равновесия реакций, равновесных выходов и экспериментальные данные по кинетике синтеза галогенфторидов позволили представить механизм реагирования как цепной по схеме:

а) Инициирование цепей:

$F_2 + M^* \rightarrow F + F + M$;

$X_2 + M^* \rightarrow M + X + X$;

$F_2 + X_2 \rightarrow XF + F + X$;

$MeF_n + F_2 \rightarrow MeF_{n+1} + F$;

б) Развитие цепей:

$F_2 + X \rightarrow F + XF$;

$X_2 + F \rightarrow X + XF$;

$XF + F \rightarrow XF_2$;

$XF_2 + F \rightarrow XF_3;\dots XF_5;\dots XF_7$;

в) Обрыв цепей:

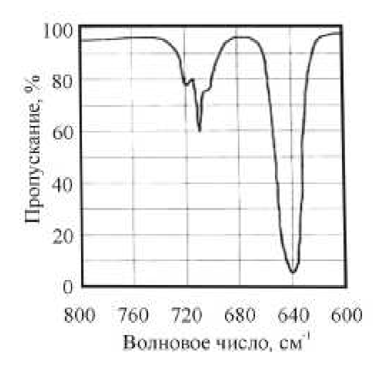
$MeF_n + F \rightarrow MeF_{n+1}$;

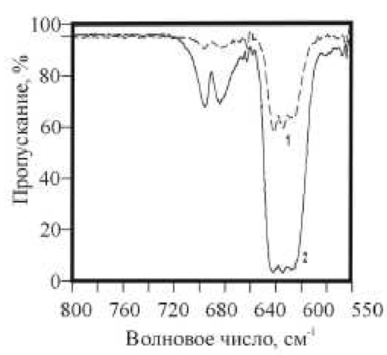
$MeF_{n+1} + F \rightarrow MeF_n + F_2$,

здесь M^* – стенка реактора, любая другая молекула, которые отдают свою избыточную энергию для диссоциации галогена на атомы; MeF_n – материал насадки или соединение, образующееся при пассивировании стенок реактора фтором, X – галоген (хлор, бром, йод).

Результаты исследований позволили осуществить синтез BrF_3, BrF_5, IF_5, IF_7 в лабораторных условиях и внедрить процесс синтеза ClF_3 на Сублиматном заводе Сибирского химического комбината (СХК). Полученные галогенфториды были использованы для экспериментального изучения кинетики фторирования ядерных материалов, а также для опытно-промышленных испытаний снятия урансодержащих отложений из технологического оборудования на производствах СХК. Кроме того, эти соединения использовали при изучении термодинамики фазовых равновесий в системах, образованных гексафторидом урана, галогенфторидами и фтороводородом.

Независимо от способа осуществления процессов фторирования ядерных материалов с применением галогенфторидов, все последующие методы разделения образующихся при этом многокомпонентных систем основаны на кристаллизационных, дистилляционных, ректификационных и сорбционных процессах, разработка которых невозможна без данных о термодинамике фазовых равновесий в этих системах. Для этого необходимы точные данные о зависимости насыщенных паров летучих компонентов от температуры, поскольку они являются основополагающими для термодинамических расчетов, определения критических параметров





b) 1 – 79,98 Па (минимально определенное давление),
2 – 666,58 Па (максимально определенное давление)

Рис. 1. ИК-спектры пентафторида иода (a) и трифторида брома (b)

веществ, а также для их идентификации. В литературе [5, 6] достаточно полно описаны термодинамические и критические параметры трифторида хлора и гептафторида йода. Однако для пентафторида йода и трифторида брома приводятся немногочисленные и противоречивые данные. По этим причинам было целесообразно экспериментально изучить зависимости давлений паров BrF_3 и IF_5 от температуры. Исследования проводили статическим методом в интервале 283,15…373,15 К [14, 15]. Для таких исследований статический метод наиболее приемлем, поскольку измерение равновесного давления пара и поддержание изотермических условий проводятся с приемлемой точностью и не представляют особых трудностей.

Синтезированные в лаборатории BrF_3 и IF_5 очищали от примесей [14, 15], идентифицировали по ИК-спектрам и температурам плавления, определяли содержание основных веществ в продуктах методом элементного химического анализа. Запись ИК-спектров проводили на спектрофотометре "Перкин-Эльмер"-6РС. Полосы поглощения в спектрах синтезированных соединений, приведенные на рис. 1 (640 и 710 см$^{-1}$ для IF_5 и 613, 621, 674 и 668 см$^{-1}$ для BrF_3), совпали со спектрами этих веществ, описанными в литературе [5, 16, 17]. В ИК-спектрах полученных IF_5 и BrF_3 отсутствовали полосы поглощения гептафторида йода, брома, моно- и пентафторида брома и фтороводорода.

Температуры плавления полученных продуктов составили 282,55±0,2 К для IF_5 и 281,90±0,2 К для BrF_3 и хорошо согласовывались с литературными данными [5, 6]. Химический анализ на бром, йод и фтор [18, 19] подтвердил стехиометрию синтезированных соединений.

Экспериментальные зависимости давления пара от температуры для IF_5 и BrF_3, обработанные статистическим методом [20], аналитически описали по известным [21–23] уравнениям Клаузиуса-Клайперона, Антуана, Кирхгофа-Ренкина-Дюпре и Кирхгофа-Эйкена, а также провели термодинамический анализ объемных свойств этих веществ [14, 15, 24]. Анализ полученных уравнений зависимости давления пара пентафторида йода от температуры в интервале 283,15…368,15 К показал, что они описывают экспериментальные данные с большей точностью, чем известные литературные выражения [5, 7].

Аналитические зависимости для описания равновесного давления пара над жидким трифторидом брома от температуры, выведенные из экспериментальных данных, позволили определить: среднее значение теплоты испарения жидкого BrF_3 в интервале температур 283,15…368,15 К, определенное по уравнению Клаузиуса-Клайперона, которое составляет $\Delta H_{исп}$ = 45,23 кДж·моль$^{-1}$; теплоту испарения при нормальной температуре кипения $\Delta H_{исп.b}$ = = 41,63 ±0,3$\Delta H_{исп.0}$ = 63,78 кДж·моль$^{-1}$. Зависимость теплоты испарения от температуры трифторида брома в интервале температур 283,15…403,15 К представлена на рис. 2, а.

Из уравнений, выведенных на основании экспериментальных данных о давлении пара пентафторида йода, нашли: среднее значение теплоты испарения жидкого IF_5, определенное по уравнению Клаузиуса-Клайперона в интервале температур 283,15…368,15 К, которое составляет $\Delta H_{исп}$ = = 41 кДж·моль$^{-1}$; теплоту испарения при нормальной температуре кипения (373,75±0,20 К) $\Delta H_{исп.b}$ = 39,03±1,27 кДж·моль$^{-1}$; теплоту испарения переохлажденной жидкости при 273,15 К $\Delta H_{исп.0}$ =46,93 кДж·моль$^{-1}$; а также зависимость теплоты испарения жидкости от температуры (в интервале 283,15…368,15 К), представленную на рис. 2, b.

Используя термодинамические параметры галогенфторидов, полученные из экспериментальных зависимостей давления их насыщенных паров от температуры, и известные литературные данные, рассчитали критические параметры IF_5 и BrF_3: температуру (T_c), давление (P_c), объем (V_c), факторы сжимаемости (Z_c) и ацентричности (ω). Результаты расчетов приведены в таблице.

Методики расчетов и подробный анализ полученных результатов описаны в работе [24]. В целом следует отметить, что значения критических параметров гексафторида урана, рассчитанные по тем же уравнениям в качестве тестовых, удовлетворительно согласуются с литературными данными, а рассчитанные значения факторов сжимаемости и ацентричности BrF_3, IF_5 и UF_6 – с известными полуэмпирическими значениями для чистых веществ с учетом полярности и склонности к ассоциации.

Фторирование уран-содержащих соединений галогенфтори-

Таблица. Средние значения критических параметров IF_5 и BrF_3

Соединение	$T_к$, K	$P_к \cdot 10^{-5}$, Па	$V_к \cdot 10^6$, м^3·моль$^{-1}$	$Z_к = \frac{P_к \cdot V_к}{R \cdot T_к}$	ω
BrF_3	618,905	55,405	143,92	0,2385	0,50±0,02
IF_5	563,180	79,188	192,34	0,3292	0,60±0,01

дами

В настоящее время широко используются водно-экстракционные схемы переработки ядерного топлива. Существенным недостатком этих схем является накопление больших объемов высокотоксичных жидких отходов. С этой точки зрения наиболее перспективными являются фторидно-дистилляционные методы переработки, основанные на фторировании ядерного топлива фтором и фторидами галогенов [1–4].

Были изучены [8, 9, 25] процессы фторирования оксидов урана газообразным трифторидом хлора в интервале температур 323,15…573,15 К и растворами ClF_3 и BrF_3 во фтороводороде. Исследования проводили методом непрерывной гравиметрии.

Таблетки диоксида урана различной плотности обрабатывали растворами трифторида хлора во фтороводороде с содержанием 23; 35; 48 % мас. ClF_3 и растворами с массовым отношением $ClF_3 : HF = 0,92 : 1$ с добавкой 2,5; 5; 10 и 20 % мас. KF. Фторид калия вводили в виде его бифторида. Фторирование таблетированного UO_2 растворами ClF_3 в HF проводили при температурах 283,15; 293,15; 303,15 К, а в присутствии фторида калия – при 293,15 К. Реакции фторирования в растворах протекали достаточно быстро: от 3,5 минут при 303,15 К до 25 минут при 283,15 К. Присутствие фторида калия в растворах снижало скорость реакции в несколько раз.

Прессованные, спеченные, насыпной слой спеченных таблеток диоксида урана, а также таблетки реального тепловыделяющего элемента на основе UO_2, диспергированного в металлическом магнии, подвергали обработке жидкими смесями BrF_3-HF, содержащими 20; 33; 50; 66; 80 % мас. BrF_3 с 10-кратным избытком трифторида брома по отношению к диоксиду урана при температурах 283,15; 293,15; 303,15; 313,15; 333,15; 353,15 К. Во всех опытах реакции проводили до полного исчезновения твердой фазы.

Установлено, что процесс растворения диоксида урана в растворах ClF_3-HF и BrF_3-HF описывается моделью равномерно уменьшающегося зерна с одновременным вступлением в реакцию всех точек поверхности. К… ение этой модели имеет вид [26]: $1-(1-\alpha)^{1/3} = k\tau$, где α – степень превращения, мас. доли; k – константа скорости реакции, с$^{-1}$; τ – время реагирования, с. По этому уравнению рассчитали константы скорости реакции (k) для всех исследованных составов раствора и температур. Из зависимости константы скорости реакции от температуры (уравнение Аррениуса) определили значения кажущейся энергии активации, которые составили 22,4 и 27,8 кДж·моль$^{-1}$ для растворов с содержанием 23 и 48 % мас. ClF_3, и 19,4 и 24,2 кДж·моль$^{-1}$ для растворов с содержанием 33 и 66 % мас. BrF_3. Полученные значения энергии активации характеризуют процесс фторирования таблеток диоксида урана растворами галогенфторидов в HF как лимитируемый первой переходной областью гетерогенной кинетики по Зельдовичу [27].

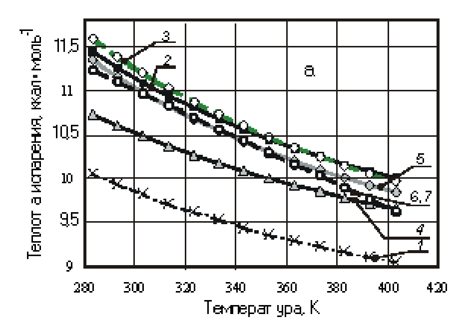
В результате изучения механизма процессов фторирования диоксида урана растворами галогенфторидов методами рентгенофазового анализа и инфракрасной спектрометрии установлено, что промежуточным продуктом реакций является уранилфторид, а конечными продуктами – гексафторид урана, галогенфториды и фтороводород [3, 8, 11].

Фторирование оксидов урана газообразным трифторидом хлора проводили при его давлениях 6,7…26,7 кПа с циркуляцией газовой фазы. Экспериментальные данные гетерогенной реакции фторирования трифторидом хлора табле… по уравнению А.М. Гистлинга $1-\frac{2}{3}\alpha-(1-\alpha)^{2/3} = k\tau$, где k – константа скорости реакции, с$^{-1}$ [9, 28].

Зависимости константы скорости реакции от температуры обработали по закону Аррениуса в виде

$$\lg k = \phi\left(\frac{1}{T}\right).$$

Установлено, что константа скорости реакции (k)



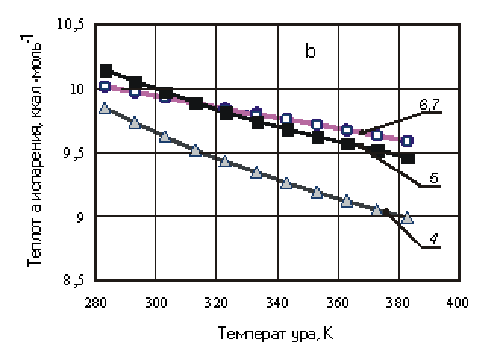


Рис. 2. Изменение теплоты испарения BrF_3 (а) и IF_5 (б) от температуры. Вычислено из уравнений: 1) Руффа и Брайда [5]; 2)Оливера и Грисарда [5]; 3) уравнения [1]; зависимостей в форме уравнений: 4) Клаузиуса-Клайперона [15, 16]; 5) Антуана [15, 16]; 6, 7) КирхгофаРенкина-Дюпре [15, 16]

зависит как от температуры реакции, так и от давления ClF_3, а энергия активации зависит от давления. Значение энергии активации реакции в интервале температур 323,15…423,15 К изменяется от 19,77 кДж·моль$^{-1}$ при давлении ClF_3 20 кПа до 10,21 кДж·моль$^{-1}$ при 40 кПа. Согласно классификации лимитирующих стадий гетерогенных процессов по Зельдовичу [27], рассматриваемая реакция лимитируется внешней диффузией.

При фторировании таблетированного диоксида урана газообразным ClF_3 при всех изменяемых параметрах наблюдали увеличение начальной массы таблеток. Кривые имели явно сигмоидный вид, характерный для автокаталитических реакций или для реакций, в которых конечный продукт образуется через промежуточные стадии [26, 29]. Для обработки экспериментальных данных выбрали кинетическую модель топохимических реакций, согласно которой химическое взаимодействие начинается с поверхностных точек – на зародышах ядер – с последующей диффузией внутрь, вызывая разрыхление поверхности. Кинетическое уравнение Проута и Томпкинса [27], хорошо описывающее этот механизм, имеет вид:

$$\text{ф}\,\frac{\text{б}}{\text{б}-{}’} = \text{к} \cdot \; + \text{х}$$

где С – постоянная интегрирования; k – константа скорости реакции, с$^{-1}$.

Определенные по этому уравнению константы скорости в зависимости от температуры обработали по уравнению Аррениуса. Значения констант скоростей реакции, как и в предыдущем процессе, зависят от температуры и давления. Энергия активации в зависимости от давления изменяется от 37,1 кДж·моль$^{-1}$ при 6,7 кПа ClF_3 до 25,3 кДж·моль$^{-1}$ при 26,7 кПа ClF_3, что указывает на первую переходную область диффузионной макрокинетики по Зельдовичу [27], т.е. наряду с внешней диффузией реагентов ClF_3 и UF_6 (первого – к ядру реагирования, другого – от ядра) процесс переходит во внутридиффузионную область. Диффузия трифторида хлора в микропоры и микротрещины вызывает торможение скорости процесса.

Результаты кинетических исследований газофазного фторирования таблетированных U_3O_8 и UO_2 трифторидом хлора, а также масс-спектрометрический анализ газообразных и рентгенофазовый анализ твердых промежуточных продуктов, позволили представить схему фторирования в виде следующей последовательности реакций:

$$U_3O_{8(тв)} + 6ClF_3 = 3UF_{6(г)} + 3Cl_2 + 4O_2;$$
$$U_3O_{8(тв)} + 3ClF_3 = 3UO_2F_{2(тв)} + O_2;$$
$$UO_2F_{2(тв)} + 2ClF_3 = UF_{6(г)} + 2ClF + O_2;$$
$$UO_{2(тв)} + ClF_3 = UO_2F_{2(тв)} + ClF;$$
$$UO_2F_{2(тв)} + 2ClF_3 = UF_{6(г)} + ClO_2F + ClF;$$
$$ClO_2F = ClF + O_2.$$

Во время эксплуатации разделительного оборудования, работающего в среде гексафторида урана, в нем накапливаются коррозионные отложения, приводящие к снижению надежности газовых центрифуг. Эти отложения на 94 % мас. состоят из оксотетрафторида урана и на 6 % мас. – из пентафторида или тетрафторида урана. В Институте молекулярной физики РНЦ «Курчатовский институт» был предложен и исследован, а на Сибирском химическом комбинате успешно прошел опытно-промышленную апробацию способ удаления из технологического оборудования урансодержащих отложений газообразной смесью трифторида брома и гептафторида йода. Было показано, что эта смесь проявляет высокую химическую активность по отношению к фторидам и оксофторидам урана при пониженных давлениях и при температурах, близких к комнатной. В процессе удаления твердых отложений из газовых центрифуг трифторид брома фторирует их до гексафторида урана по реакциям [30, 31]:

$$3UOF_4 + 2BrF_3 \rightarrow 3UF_6 + Br_2 + 3/2O_2;$$
$$3UF_5 + BrF_3 \rightarrow 3UF_6 + 1/2Br_2;$$
$$3UF_4 + 2BrF_3 \rightarrow 3UF_6 + Br_2.$$

Образующийся бром вступает в реакцию с находящемся в смеси гептафторидом йода, в результате которой происходит регенерация трифторида брома:

$$3IF_7 + Br_2 \rightarrow 2BrF_3 + 3IF_5,$$

т.е. гептафторид йода в газовой смеси выполняет не только функцию газа-носителя, но и реагента, поддерживающего постоянное содержание трифторида брома в смеси.

Заключение

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

- Разработана технология синтеза фторидов галогенов, предложен вероятный цепной механизм их синтеза.
- Показано, что фторирование оксидов урана галогенфторидами подчиняется закономерностям диффузионной кинетики.
- Изучены зависимости давлений насыщенных паров жидких BrF_3 и IF_5 от температуры. Предложены аналитические выражения для описания этих зависимостей. Рассчитаны некоторые термодинамические и критические параметры этих соединений.

Работа выполнена при поддержке гранта по фундаментальным исследованиям в области технических наук Министерства образования РФ № 017с2003 и гранта межотраслевой программы сотрудничества между Министерством образования РФ и Министерством РФ по атомной энергии № 032с2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столер С., Ричардс Р. Переработка ядерного горючего. – М.: Атомиздат, 1964. – 648 с.
2. Переработка облученного топлива методом летучести фторидов. – М.: Атомиздат, 1971. – Т. 11В. – С. 1628.
3. Щербаков В.И., Зуев В.А., Парфенов А.В. Кинетика и механизм фторирования соединения урана, плутония и нептуния фтором и галогенфторидами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
4. Патент 1501370 Франции. МКИ G21C. Фторирование ядерного горючего.

5. Николаев Н.С., Суховерхов В.Ф. Химия галоидных соединений фтора. – М.: Наука, 1965. – 348 с.
6. Никитин И.В. Фториды и оксофториды галогенов. – М.: Наука, 1989. – 118 с.
7. Rogers M.T., Speirs J.L., Panish M.B. Iodine Pentafluoride, Freezing and boiling Point, Heat of Vaporization and Vapor Pressure – Temperature Relations // J. Amer. Chem. Soc. – 1954. – V. 76. – P. 4843–4844.
10. Руководство по неорганическому синтезу: в 6-ти томах. Т. 1. Пер. с нем. / Под ред. Г. Брауэра. – М.: Мир, 1985. – 258 с.
11. Курин Н.П., Лапин П.В., Баландин А.П., Востриков П.Н., Жерин И.И. Синтез некоторых фторидов галогенидов // Химическая технология и автоматизация предприятий ядерного цикла: Сборн. научн. трудов. – Томск, 1999. – С. 30–34.
12. Галкин И.П., Крутиков А.Б. Технология фтора. – М.: Атомиздат, 1968. – 188 с.
13. Курин Н.П., Лапин П.В., Жерин И.И., Усов В.Ф. Физико-химические свойства систем на основе фторидов галогенов // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – Вып. 3. – С. 157–167.
14. Жерин И.И., Амелина Г.Н., Гордиенко В.В. и др. Объемные свойства IF_5 и BrF_3. Сообщение 1. Давление насыщенного пара пентафторида иода // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – Вып. 3. – С. 252–263.
15. Амелина Г.Н., Жерин И.И., Усов В.Ф. и др. Объемные свойства IF_5 и BrF_3. Сообщение 2. Давление насыщенного пара пентафторида брома // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – Вып. 3. – С. 263–273.
16. Began G.M., F1etcher W.N. Колебательные спектры и силовые постоянные валентности квадратно-пирамидальных молекул $XeOF_4$, IF_5, BrF_5, и ClF_3 // J. Chem. Phys. – 1965. – V. 42. – № 6. – P. 2236–2242.
17. Жиганова А.А., Рудников А.И., Торгунаков Ю.Б. Некоторые аспекты количественного определения галогенфторидов и гексафторида урана в газовых смесях ИК-спектрометрическим методом //INTERSIBFLUORINE-2003: Сборн. труд. I Междунар. Сибир. семин. – Новосибирск, 2003. – С. 112–116.
18. Суховерхов В.Ф. Таканова Н.Д. Определение фтора, брома, щелочного металла и сурьмы во фторидах брома и их комплексных соединениях // Журнал аналитической химии. – 1978. – Т. 33. – № 7. – С. 1365–1369.
19. Курин Н.П., Тушин П.П., Жерин И.И. Применение трифторида брома для определения воды во фтористом водороде // VIII Всесоюзного симпозиума по химии неорганических фторидов: Тез. докл. – Полевской, 1987.
20. Основы аналитической химии. Кн. 1 / Под ред. Ю.А. Золотова. – М.: Высшая школа, 1999. – 352 с.
21. Морачевский А.Г., Смирнова Н.А., Балашова И.М., Пукинский И.Б. Термодинамика разбавленных растворов неэлектролитов. – Л.: Химия, 1982. – 240 с.
22. Физическая химия. Кн. 1, 2 / Под ред. Я.И. Герасимова. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 1148 с.
23. Хала Э., Пик И., Фрид В., Вилим О. Равновесие между жидкостью и паром / Под ред. А.Г. Морачевского. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 438 с.
24. Амелина Г.Н., Жерин И.И., Калайда Р.В. Объемные свойства IF_5 и BrF_3. Сообщение 3. Критические параметры BrF_3 и IF_5 // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – Вып. 3. –
8. Курин Н.П., Тушин П.П., Жерин И.И., Усов В.Ф., Лазарчук В.В. Фторирование диоксида урана трифторидом хлора в газовой фазе и растворителями ClF_3 и HF // Известия вузов. Физика. – 2000. – № 5. – С. 51–56.
9. Курин Н.П., Тушин П.П., Жерин И.И., Усов В.Ф., Лазарчук В.В. Фторирование U_3O_8 газообразным трифторидом хлора // Известия вузов. Физика. – 2000. – № 5. – С. 63–66.

С. 273–282.

25. Курин Н.П., Тушин П.П., Савицкий А.Н., Жерин И.И. Взаимодействие таблетированного диоксида урана с растворами трифторида брома во фтористом водороде // Химическая технология и автоматизация предприятий ядерного топливного цикла: Сб. научных трудов. – Томск, 1999. – С. 35–39.
26. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М.: Мир, 1972. – 554 с.
27. Еремин Е.Н. Основы химической кинетики. – М.: Высшая школа, 1976. – 374 с.
28. Будников П.П., Гистлинг А.М. Реакции в смесях твердых веществ. – М.: Стройиздат, 1971. – 487 с.
29. Розовский А.Я. Кинетика топохимических реакций. – М.: Химия, 1974. – 219 с.
30. Sakurai T., Iwasaki M. Kinetics and Mechanism of Reaction between Bromine Trifluoride Vapor and Uranium Tetrafluoride // J. Inorganic. Chem. – 1968. – Vol. 72. – № 5. – P. 1491–1497.
31. Jarry R.L., Steindler M.J. Reaction of gaseous bromine pentafluoride with uranium compounds I. The kinetics of the reactions with UF_4 and UO_2F_2 // J. Inorg. Nucl. Chem. – 1967. – Vol. 29. – P. 1591.